

Augsburg, Klaus; Hesse, David; Hamatschek, Christopher:

**Außermotorische Feinstaubemissionen an Kraftfahrzeugen - Stand und Entwicklungstendenzen**

**DOI:** [10.22032/dbt.40837](https://doi.org/10.22032/dbt.40837)

**URN:** [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2020200283](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2020200283)

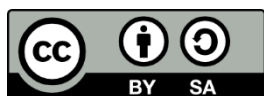
---

*Original published in:* 14. Magdeburger Maschinenbau-Tage 2019 - Magdeburger Ingenieurtag / Kasper, Roland. - Magdeburg : Otto von Guericke Universität Magdeburg, Fakultät Maschinenbau, Institut für Mobile Systeme - Lehrstuhl Mechatronik, 2019. - (2019), p. 113-125.

*Original published:* 2019-09

*ISBN:* 978-3-944722-81-8

*[Visited:* 2020-02-25]



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.  
To view a copy of this license, visit  
[http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

---

# Außermotorische Feinstaubemissionen an Kraftfahrzeugen – Stand und Entwicklungstendenzen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Augsburg<sup>1</sup>, M.Eng. David Hesse<sup>1</sup>, M.Sc. Christopher Hamatschek<sup>1</sup>

<sup>1)</sup> Technische Universität Ilmenau, Deutschland

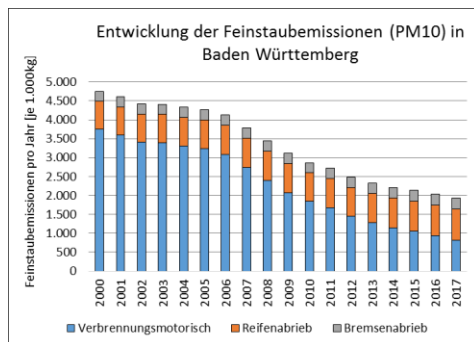
## Zusammenfassung

Um die Verzögerung von modernen Kraftfahrzeugen gewährleisten zu können, kommen üblicherweise Reibungsbremsen zur Anwendung. Dabei kommt es aufgrund tribologischer Mechanismen zu einem Verschleiß von Scheibe und Belag, was zur Emission eines partikelförmigen Bremsstaubes führt. Die emittierten Verschleißpartikel sind den Größenordnungen des Feinstaubes zuzuordnen, gelangen nahezu ungehindert in die Umwelt und stellen ein gesundheitliches Gefährdungspotential für den Menschen dar. Für die wissenschaftliche Untersuchung sind effiziente Probenahmesysteme erforderlich, welche eine qualitativ hochwertige und reproduzierbare Probe bereitstellen. In einem ersten Teil werden Erkenntnisse zum Partikelinjektions- und ausbreitverhalten innerhalb eines Probenahmesystems für die Erfassung partikelförmiger Bremsenemissionen vorgestellt. In einem zweiten Teil werden Primär- und Sekundärmaßnahmen zur Minimierung des Feinstaubausstoßes vorgestellt und bewertet.

Schlüsselwörter: Bremsstaubmessungen, Bremsstaubreduktion

## 1. Einleitung

Neben verbrennungsmotorischen Emissionen werden durch den Betrieb eines Kraftfahrzeuges Partikel durch Bremsen- und Reifenabrieb sowie durch Straßenabrieb und Aufwirbelungen von Straßenstaub generiert. Die in Bild 1 dargestellte Entwicklung der PM<sub>10</sub>-Emissionen verdeutlicht, dass der Anteil bremsenrelevanter Emissionen im Vergleich zu verbrennungsmotorischen Emissionen geringer ist, in den vergangenen jedoch stetig ansteigt.



**Bild 1: Entwicklung der Feinstaubemissionen (PM<sub>10</sub>) [1]**



**Bild 2: Erfassung partikelförmiger Bremsenemissionen in unterschiedlichen Prüfumgebungen [5]**

Zur Erfassung partikelförmiger Bremsenemissionen unter konstanten und reproduzierbaren Bedingungen kommen typischerweise Konstantvolumen-Probenahmesysteme zur Anwendung (vgl. Bild 2 – links). Dabei wird das Bremssystem durch eine geschlossene Umhausung vollständig von der Umgebung entkoppelt und das partikelbeladene Aerosol über einen konstanten Volumenstrom zu einer Probenahme-position transportiert. Neben reduzierten Partikelverlusten und einer daraus resultierenden hohen Transporteffizienz zeichnet sich dieses Probenahmesystem durch eine minimierte Kontamination aus. Darüber hinaus ist durch ein strömungsoptimiertes Design ein hoher Grad an Uniformität und die Entnahme eines repräsentativen Teilvolumens möglich.

Die Messung von Bremsstaub an einem Schwingmassen-Bremsenprüfstand unterliegt reproduzierbaren Prüf- und Umgebungsbedingungen. Im Vergleich zu Bremsstaubmessungen am Prüfstand unterliegt der reale Fahrversuch einer Fülle von Einflussgrößen, welche einen direkten oder indirekten Einfluss auf das Messergebnis haben. Dies umfasst kontinuierlich wechselnde Strömungsbedingungen, Verkehrssituationen, Fahrereinflüsse und den Einfluss

von Partikeln externer Quellen (z.B. motorische- oder außermotorische Emissionen vorausfahrender Fahrzeuge). Das daraus resultierende Emissions- und Temperaturverhalten ist somit wenig reproduzierbar. Dennoch ist die Messung von Bremsenemissionen im Fahrversuch notwendig, da hieraus das reale Emissionsverhalten eines Fahrzeuges erfasst und eine Bewertung der beschriebenen Einflussgrößen ermöglicht wird.

## 2. Messung partikelförmiger Bremsenemissionen

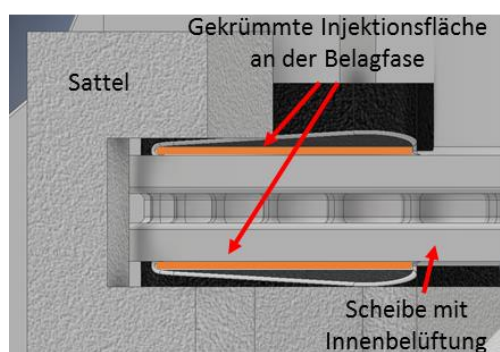
In diesem Abschnitt werden grundlegende Erkenntnisse zum Partikelinjektions- und Ausbreitungsverhalten sowie zu den messtechnischen Validierungsmethoden vorgestellt. Darüber hinaus werden Untersuchungen zur Messfähigkeit bestehender bzw. für den Anwendungsfall verbrennungsmotorischer Abgasemissionen entwickelter Partikelmesssysteme vorgestellt. In einem zweiten Abschnitt wird auf die Entwicklung eines Probenahmesystems für Realfahrtanwendung sowie grundlegende Einflussgrößen eingegangen.

### 2.1 Messung unter Laborbedingungen

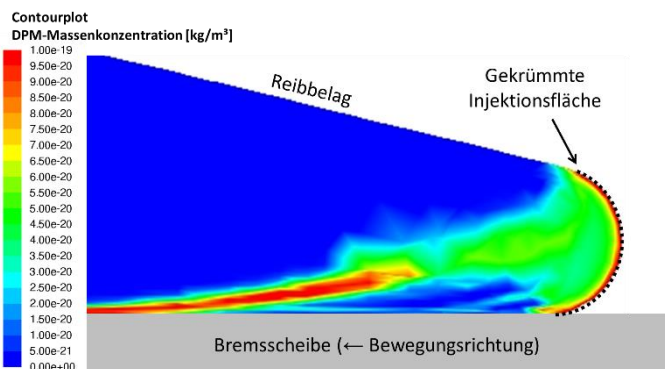
Am Beispiel eines stationären Probenahmesystems (CVS) wird eine Methodik zur simulativen Untersuchung der Partikelinjektion und Partikelverteilung vorgestellt. Das Ziel ist die Nachbildung aller Vorgänge, denen die Partikel innerhalb eines Probenahmesystems ausgesetzt sind. Zur Bewertung der Transporteffizienz emittierter Partikel sind das Partikelverhalten in der Strömung sowie die Interaktion der Partikel mit der Wand zu modellieren. Bei der Modellierung wird auf das Reynolds Stress Model (RSM) zurückgegriffen, wodurch Effekte wie die Stromlinienkrümmung, Wirbel und Rotationen dargestellt werden können und Aussagen über komplexe Strömungen ermöglicht werden. Für die Vernetzung gilt die Forderung, die gesamte Grenzschicht durch eine feine Vernetzung aufzulösen, wodurch die Bestimmung realitätsnaher Ergebnisse ermöglicht wird. Zur Simulation rotierende Komponenten, wie der Reibring der Bremsscheibe, die Antriebswelle, die Radnabe sowie die gesamte Innenbelüftung der Bremsscheibe, wird ein zusätzliches Referenzsystem definiert.

#### Partikelinjektion

Die Injektion wird über die gekrümmte Fläche des verrundeten Übergangs an der Belagfase (vgl. Bild 3) durchgeführt. Da die mit der Randbedingung "moving wall" versehene Bremsscheibenoberfläche zwangsläufig Luft aus dem Bereich der Belagfase zieht, stellt sich dort eine Strömung ein, die aufgrund ihrer Bedeutung für die Partikelinjektion besonders detailliert abgebildet werden muss und daher ein fein aufgelöstes Netz erfordert. Partikel werden an der Kante zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe abgegeben und gehen anschließend in die Grenzschicht der Bremsscheibe über (vgl. Bild 4). Dieser Effekt ist durch die Ausbildung einer Strömung aus den darüber liegenden Bereichen in die sich aufbauende Grenzschicht zu erklären.



**Bild 3: Darstellung der Injektionsfläche (Injektion über die Belagfase [4])**

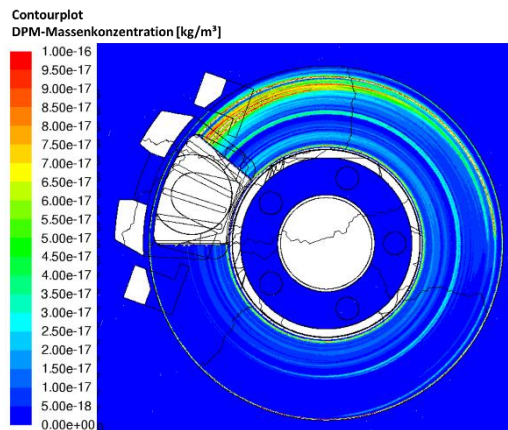


**Bild 4: Massenkonzentration im Bereich der Injektionsfläche [4]**

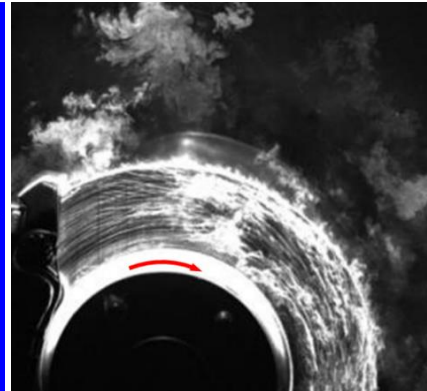
Die Konzentration an der Injektionsstelle setzt sich in diesem Bereich nahezu unverändert für den Rest der Umrundung der Scheibenoberfläche fort. Die Höhe der Schicht mit hoher Partikelmassenkonzentration kann primär auf ca. 0,01 - 0,02 mm eingegrenzt werden. Insgesamt ist auf Vorder- und Rückseite der Scheibe ein ähnliches Verhalten erkennbar.

Der Injektionsmechanismus besteht darin, dass Partikel, gebunden in der Grenzschicht, teils die Bremsscheibe umrunden (vgl. Bild 5) und rückseitig am Bremsbelag an die Umgebung abgegeben werden. Die periphere Luftbewegung an der äußeren Reibfläche ist nach außen gerichtet, an der hinteren Reibfläche nach innen. Die

fliehkraftbedingte Radialbewegung der Partikel führt zur radialen Ablösung von Partikeln von der Bremsscheibe. Die Partikel sind in ihrer Bewegung nach Verlassen der Grenzschicht maßgeblich von der Strömung beeinflusst.



**Bild 5: Partikelmassenkonzentration 1 µm-Partikel (0,01 mm) [5]**

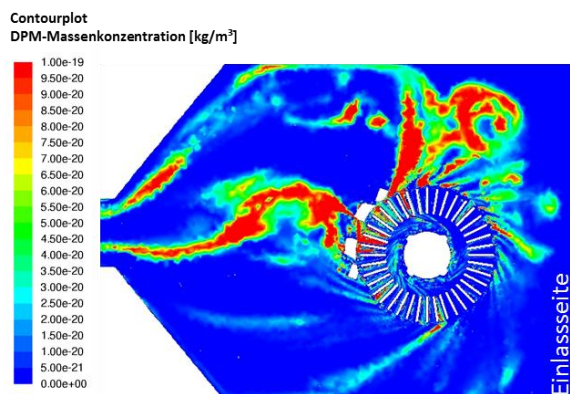


**Bild 6: Laseraufnahmen der Partikelkonzentrationen (120→80km/h; 30bar)**

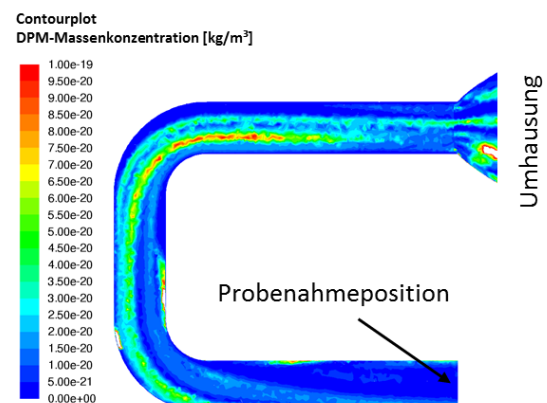
Insgesamt ist festzuhalten, dass der Injektionsmechanismus von zahlreichen Größen bestimmt wird und für eine ganzheitliche Betrachtung der Vorgänge innerhalb eines Probenahmesystems berücksichtigt werden muss. Die Visualisierung der Partikelbewegung in Scheibennähe erfolgt mittels einer laserbelichteten Ebene. Die in Bild 6 dargestellte Aufnahme (120→80 km/h) verdeutlicht das hochgradig transiente Verhalten der Partikelemissionen. Auch die Strömung in der Umhausung ist zeitlich nicht stabil. Gut erkennbar ist, dass die auf der Scheibenoberfläche mitbewegten Konzentrationen über den gesamten Verlauf der Scheibe vorhanden sind. Wie bereits erläutert nimmt die Abhängigkeit von Partikelbewegung und Scheibenrotation mit dem Abstand zur Scheibenoberfläche ab.

#### Partikelverteilung innerhalb eines stationären Probenahmesystems

Die Strömung in der Umgebung der Radbremse bestimmt die Bewegung der Partikel und beeinflusst die Orte der Partikelabscheidung sowie die Verteilung im Kanalquerschnitt. Die Strömung innerhalb des Probenahmesystems resultiert aus der Absaugung infolge des adaptierten Lüfters sowie durch die rotierenden Bauteile, insbesondere durch die Innenbelüftung der Scheibe. Die durch radiale Rippen ausgeführte Innenbelüftung wirkt wie ein Radialverdichter, wobei die Luft von innen nach außen bewegt wird. Die gezeigte Strömung führt zum Abtransport von Partikeln der Außenseite. Partikel, die an der Rückseite (rechts) injiziert werden, folgen teilweise der Bewegung in Richtung des Radträgers und durchqueren die Innenbelüftung. Die radiale Bewegung der Luft aus der Scheibe und das Einströmen in das Innere der Scheibe sind Effekte im Kontext einer großräumigeren Wirbelbildung, was einen weiteren signifikanten Einfluss auf die Partikelverteilung darstellt.



**Bild 7: Partikelverteilung in einem stationären Probenahmesystem [4]**



**Bild 8: Partikelverteilung - DPM Massenkonz. für 10 µm-Partikel 80 km/h [4]**

Infolge der mit zunehmender Rotationsgeschwindigkeit stetig ansteigenden Partikelverteilung innerhalb der Umhausung (vgl. Bild 7), welche primär aus den Injektionsbedingungen, Ablösung aus der Grenzschicht und

trägheitsbedingten Einflüssen resultiert, wird dieser Einfluss reduziert. Die Partikelinjektion und die Ausbreitung der Partikel im Raum sind für Partikel der Durchmesser 100nm und 1µm kaum zu unterscheiden. 10µm-Partikel zeigen ein stark abweichendes Verhalten. Diese werden zu einem großen Teil nicht in der Grenzschicht gebunden sondern verlassen tangential die Bremsscheibe in Richtung der Rotation von der Injektionsstelle ausgehend. Die Partikelverteilung innerhalb des Abluftkanals ist in Bild 8 exemplarisch für 10 µm-Partikel dargestellt. Es ist erkennbar, das bis zur Probenahme position durch die integrierte Doppelumlenkung eine signifikante Steigerung der Uniformität erreicht werden kann, was die Gewährleistung einer repräsentativen Probenahme ermöglicht. Die Transporteffizienz beträgt im Falle einer Bremsung aus 80 km/h ca. 91 % für 1 µm-Partikel, 86% für 2,5 µm-Partikel und lediglich 36 % für 10 µm-Partikel. Die Transporteffizienz wird demnach signifikant vom Partikeldurchmesser beeinflusst. Weiterhin sind die Rotationsgeschwindigkeit und auch der Volumenstrom als einflussreiche Größen zu werten. Insgesamt ist die Auslegung eines Probenahmesystems folglich als Kompromissentscheidung zwischen hoher Transporteffizienz und Uniformität zu verstehen und unterscheidet sich demnach signifikant von Probenahmesystemen (Verdünnungstunnel) für verbrennungsmotorische Emissionen. Das Injektions- und Ausbreitverhalten partikelförmiger Bremsenemissionen kann mittels numerischer Methoden vollständig abgebildet werden. Empirische Modelle sind aufgrund der Komplexität der Vorgänge nur näherungsweise zur Bestimmung der Transporteffizienz geeignet. Darüber hinaus ist die Bestimmung der Transporteffizienz bzw. größenspezifischer Verluste innerhalb geschlossener Probenahmesysteme möglich. Dadurch können die komplexen Vorgänge bis zur Position der Probenahme untersucht und bewertet werden. Darüber hinaus ist die vorgestellte Methodik auch auf andere Systeme, wie ein Probenahmesystem für Realfahreranwendung oder Feinstaubfilter übertragbar.

### Messbarkeit partikelförmiger Bremsenemissionen

Dieser Abschnitt dient zur Überprüfung der Messbarkeit partikelförmiger Bremsenemissionen mittels der vornehmlich für die Messung verbrennungsmotorischer Emissionen entwickelten Partikelmesssysteme. Kondensationspartikelzähler (CPC) stellen in Bezug auf Sensitivität, Reaktionszeit und Zähleffizienz die Referenz zur Bestimmung einer Partikelanzahlkonzentration ( $\#/cm^3$ ) dar. Kondensationspartikelzählern liegt das Messprinzip der Streulichtmessung zugrunde. Die zu messenden Partikel werden durch Kondensation vergrößert und damit messbar (vgl. Bild 12). Da sich die Eigenschaften von Bremsenpartikeln und verbrennungsmotorischen Partikeln unterscheiden, ist eine Überprüfung des Messbereiches, der Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung größenspezifischer Verluste (PCRF) sowie der Verdünnungsfaktoren zu Erfassung eines weiten Konzentrationsbereiches zu überprüfen. Für letztgenannten Punkt ist zu berücksichtigen, dass im Falle niedriger Rotationsgeschwindigkeiten und effizienter Filterung der in die Umhausung einströmenden Luft Konzentrationen  $< 1,0E+2 \#/cm^3$  erfasst werden müssen. Dies bedeutet, dass ohne Korrektur der Hintergrundkonzentration (Forderung: konstantes Niveau) das Messergebnis insbesondere in Phasen ohne Rotation bzw. bremseninduzierter Emission signifikant beeinflusst werden kann. Im Falle höchster Beanspruchung (thermisch und mechanisch) und niedriger Gesamtverdünnung können Konzentrationen über  $5,0E+6 \#/cm^3$  vorliegen. Zur Untersuchung des Einflusses des Partikeldurchmessers auf den kalibrierten CPC-cut-off (D50 – CPC-Zähleffizienz), folgt ein Vergleich zwischen 2.5 nm, 10 nm und 23 nm-CPC (je ohne vorgeschalteten Zyklon und thermischer Konditionierung), wobei eine Doppel-Verdünnungsstufe (Injektor) vorgeschaltet ist. Für die Untersuchung kommt eine konventionelle Graugusscheibe mit kupferhaltigem ECE-Belag zur Anwendung.

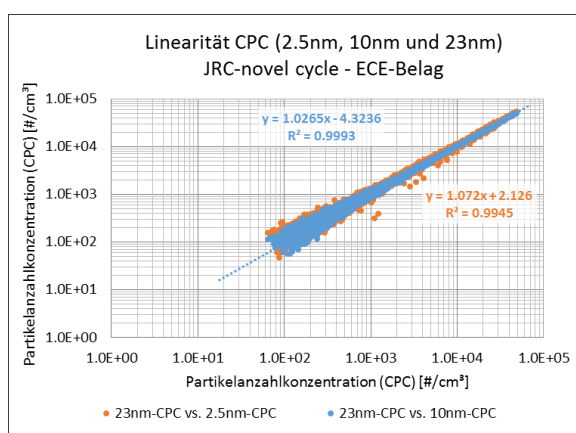


Bild 9: Linearität CPC (JRC-novel cycle) [4]

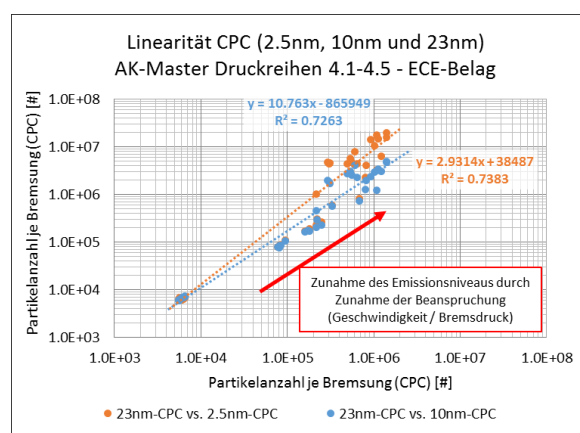


Bild 10: Linearität CPC (AK-M. Druckreihen) [4]

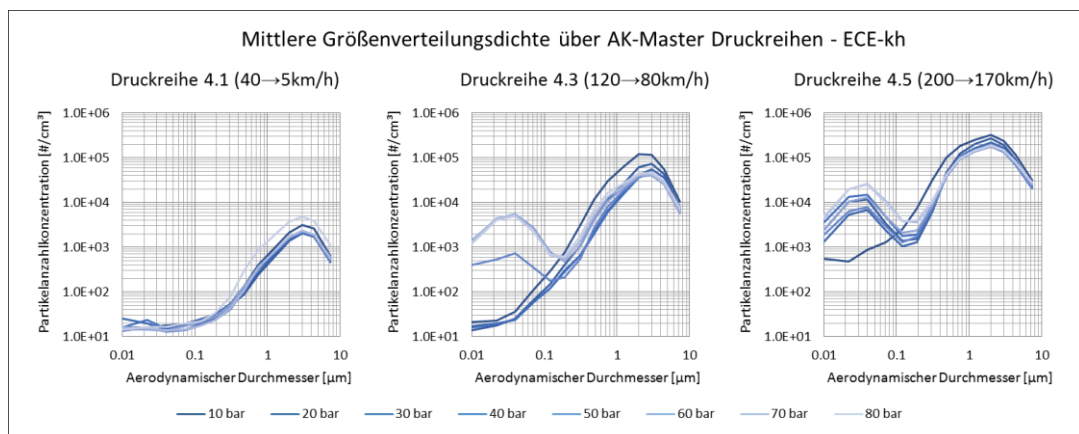
Als Testzyklus dient der durch die PMP Task Force 1 („Particle measurement programme“ des Joint Research Center / Europäische Kommission) entwickelte JRC-novel cycle dar. Dieser basiert auf der WLTP-Datenbasis und



bietet dadurch in Bezug auf das Temperaturniveau, Rotationsgeschwindigkeit und Bremsdruck einen Direktbezug zu realen Fahrbedingungen. Der Zyklus ist durch 303 Bremsapplikationen, einer Distanz von 192 km und einer mittleren Verzögerung von  $1,0 \text{ m/s}^2$  definiert. Darüber kommen einzelne Sektionen der AK-Master-Prüfprozedur zu Anwendung. Diese dient ursprünglich zur Untersuchung des Reibwertverhaltens eines Reibmaterials hinsichtlich Druck-, Temperatur- und Geschwindigkeitseinfluss, d.h. zum Vergleich unter möglichst gleichen Bedingungen. Für den vorliegenden Anwendungsfall ermöglicht eine Druck-, Temperatur- und Geschwindigkeitsvariation die Untersuchung von Einflussgrößen auf das Emissionsverhalten.

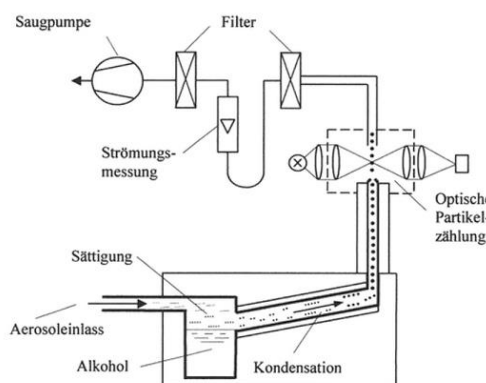
Die in Bild 9 gegenübergestellten Partikelanzahlkonzentrationen (Linearitätsvergleich) unterschiedlich kalibrierter CPCs verdeutlichen im Falle des JRC-novel cycle nur geringste Unterschiede. Das 2.5 nm-CPC misst eine um ca. 5 % erhöhte Konzentration gegenüber dem 23nm-CPC. Im Falle des 10 nm-CPCs beträgt diese ca. 2%. Insgesamt kann für den Zyklus und die Eigenschaften der emittierten Partikel ein hoher Grad an Linearität nachgewiesen werden.

Die Linearitätsüberprüfung anhand der AK-Master Druckreihen erfolgt unter Variation der Rotationsgeschwindigkeit und des Bremsdruckes. Die Geschwindigkeitsbereiche beinhalten Stadt-, Land- und Autobahnsektionen. Der Linearitätsvergleich in Bild 10 verdeutlicht, dass mit Zunahme der Beanspruchung (Rotationsgeschwindigkeit und Bremsdruck) die Abweichung zunimmt bzw. der Grad an Linearität sinkt. Dieser Effekt ist durch lokale Spitzentemperaturen in der Reibzone zu erklären und führt zur Ausbildung einer bimodalen Verteilung, welche durch signifikante Partikelkonzentrationen  $< 0,1 \mu\text{m}$  charakterisiert ist (vgl. Bild 11).

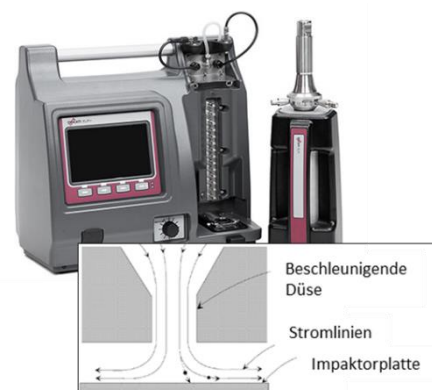


**Bild 11: Größenverteilungsdichte über AK-Master Druckreihen 4.1, 4.3 und 4.5 [4]**

Die Erfassung der größen aufgelösten Anzahlkonzentration über einen Größenbereich von  $0,006 \mu\text{m}$  –  $10 \mu\text{m}$  erfolgt mittels elektrischem Niederdruck-Kaskadenimpaktor (ELPI+) der Fa. Dekati. Die in den Impaktor einströmenden Partikel (vgl. Bild 13) werden elektrisch geladen. Je Impaktorstufe (zur größen selektiven Fraktionierung) besitzt eine beschleunigende Düse. Durch Impaktion werden Partikel eines spezifischen (Trenn-) Durchmessers je Impaktorstufe abgeschieden und es erfolgt ein Ladungsaustausch, welcher gemessen wird und in eine Anzahlkonzentration umgerechnet wird.



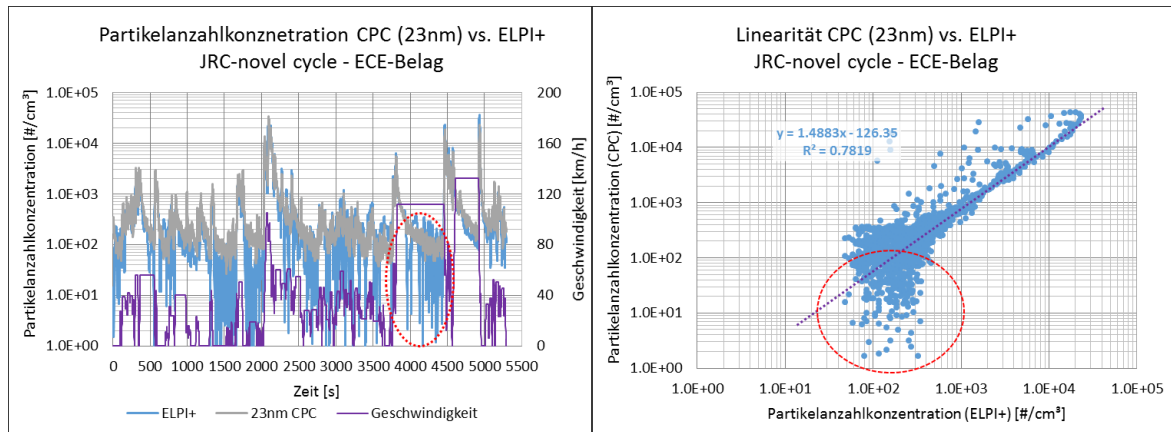
**Bild 12: Aufbau/Funktion eines Kondensationspartikelzählers (CPC)**



**Bild 13: Aufbau/Funktion eines (elektrischen) Niederdruck-Kaskadenimpaktors [6]**

Zusätzlich zu der ersten Mode ( $< 0,1 \mu\text{m}$ ) ist eine zweite Mode erkennbar, welche durch Festkörperpartikel ( $> 0,5 \mu\text{m}$ ) gekennzeichnet ist, deren Bildung durch Abrasivverschleiß zu erklären ist. Insgesamt sind Bremsstaubpartikel

über einen Größenbereich zwischen  $0,01\ \mu\text{m}$  –  $10\ \mu\text{m}$  nachweisbar. Durch das messprinzipbedingte Aufkondensieren des Kondensationspartikelzählers (CPC) geht die Größeninformation verloren, weshalb zur Bestimmung einer größen aufgelösten Anzahlkonzentration auf elektrisch basierte Messsysteme zurückgegriffen wird. Der in Bild 14 dargestellte Vergleich zwischen optischem und elektrisch basierten Messsystem verdeutlicht im Falle geringster Intensitäten der Anzahlkonzentration  $\leq 5\text{E}+02\text{#/cm}^3$  ein abweichendes Messsignal (rot markierter Bereich). Die durch das elektrisch basierte Messsystem detektierten Anzahlkonzentrationen sind typisch für Stillstand- und Rollphasen sowie geringen Initialgeschwindigkeiten ( $\leq 30\text{km/h}$ ). Dieser Effekt ist weiterhin durch einen Linearitätsvergleich (vgl. Bild 15) zu erkennen. Darüber hinaus ist auch für höhere Konzentrationsbereiche eine temporäre Über- oder Unterinterpretation gegenüber dem CPC erkennbar.

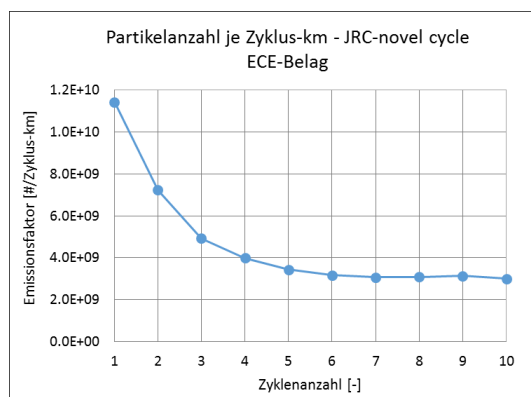


**Bild 14: Partikelanzahlkonzentration CPC vs. ELPI+ (JRC-novel cycle) [4]** **Bild 15: Linearität CPC vs. ELPI+ (JRC-novel cycle) [4]**

Neben den materiellen Einflussgrößen (Reibbelag und Schiebe) wirkt das Beanspruchungskollektiv signifikant auf die Eigenschaften der emittierten Partikel. Durch die teils dynamischen Änderungen über den Verlauf einer Einzelbremsung ist die Anwendung elektrisch basierter Messsysteme insgesamt als Herausforderung zu betrachten. Für die Messung der Partikelanzahlkonzentration ist deshalb der Kondensationspartikelzähler (CPC), sowohl für die stationäre, als auch mobile (RDE) Messung, als bevorzugtes Messsystem zu betrachten.

#### Messung der Partikelanzahl und Partikelmasse je Zyklus-km

Nachdem das Injektions- und Ausbreitverhalten partikelförmiger Bremsenemissionen auf Basis numerischer Methoden vorgestellt und die Messfähigkeit unterschiedlicher physikalischer Messprinzipie untersucht wurde, folgt an dieser Stelle die Bestimmung der Partikelanzahl und Partikelmasse je Zyklus-km.



**Bild 16: Verlauf der Partikelanzahl je Zyklus-km (JRC-novel cycle) über 10 Zyklen**

Damit soll eine grundsätzliche Abschätzung über die Emissionsfaktoren und damit ein Direktvergleich mit den derzeit gültigen Grenzwerten verbrennungsmotorischer Abgasemissionen ermöglicht werden. Die Untersuchungen basieren auf der oben beschriebenen konventionellen Graugusscheibe mit kupferhaltigem ECE-Belag eines Mittelklassefahrzeuges (simulierte Fahrzeugmasse:  $1.680\text{ kg}$ ) und dem stationären Konstantvolumen-Probenahmesystem (CVS). Die hohe Transporteffizienz und Partikelverteilung über den Querschnitt des Abluftkanals ermöglichen die Bereitstellung einer repräsentativen Probe. Die Partikelzählung erfolgt mittels PMP-konformen CPC ( $0,023\ \mu\text{m}$  –  $2,5\ \mu\text{m}$ ) mit vorgeschalteter Verdünnungsstufe. Als Testzyklus dient der JRC-novel

cycle. Gemäß des in Bild 16 gegenübergestellten Verlaufes, nimmt die verdünnungskorrigierte und hintergrundbereinigte Partikelanzahl je Zyklus-km mit zunehmender Anzahl an Zyklen ab, d.h. es liegt eine Abhängigkeit von der Konditionierung bzw. dem Einlaufzustand vor. Nach abgeschlossener Konditionierung (ab Zyklus 7) liegt ein reproduzierbares Emissionsniveau mit einer Streuung  $< 10\%$  vor. Der mittlere Emissionsfaktor (ab Zyklus 7) beträgt ca.  $3,0E+9 \text{ \#/Zyklus-km}$ . Der Emissionsfaktor liegt damit um etwa Faktor 200 unterhalb des anzahlbezogenen Grenzwertes für Verbrennungsmotorik von  $6,0E+11 \text{ \#/Zyklus-km}$ .

Zur Messung der emittierten Partikelmasse wird ein Filterhalter direkt an der integrierten Probenahmesonde adaptiert. Mittels filterbasierter Messung konnte eine mittlere Partikelmasse je Zyklus-km von  $4,7 \text{ mg/Zyklus-km}$  nachgewiesen werden, was bereits für eine Bremse oberhalb des Grenzwertes ( $4,5 \text{ mg/Zyklus-km}$ ) liegt. Zu beachten ist, dass dieser Wert für die totale erfasste Partikelmasse ohne Größenklassifizierung gilt. Durch Vorschaltung eines Zyklons (D50-Trenndurchmesser:  $2,5 \mu\text{m}$ ) zur Bewertung anhand der Feinstaubklasse (PM<sub>2.5</sub>) beträgt der massenbezogene Emissionsfaktor ca.  $1,7 \text{ mg/Zyklus-km}$ . Hierbei fällt der hohe Massenanteil, welcher durch Partikel  $> 2,5 \mu\text{m}$  verursacht wird, auf. Die Transporteffizienz innerhalb des Probenahmesystems, aber auch in der Ansaugleitung bis hin zur Abscheidung auf dem Filter kann das massebezogene Messergebnis signifikant beeinflussen. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die bestimmten Werte lediglich auf eine einzelne Bremse beziehen. Eine Hochrechnung auf das Gesamtfahrzeug ist durch zusätzliche Messung des Emissionsfaktors für die Hinterachse möglich.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Kondensationspartikelzähler (CPC) zur Zählung partikelförmiger Bremsenemissionen eine Referenz darstellt, wohingegen unter Verwendung elektrisch basierter Messsysteme das Messergebnis signifikant beeinflusst werden kann. Die Bestimmung der Partikelmasse ist durch die gravimetrische Messung mittels Einzelfilterhalter sinnvoll. Aufgrund der Partikelgrößenverteilung, welche durch masserelevante Konzentrationen bis  $10 \mu\text{m}$  charakterisiert ist, besteht die Herausforderung in einem effizienten Transport der Partikel bis zur Probenahme-position bzw. bis zum Filter. Durch trägheitsbedingte Abscheidungen (Impaktion) ist eine signifikante Beeinflussung des massebezogenen Messwertes möglich.

## 2.2 Messung im realen Fahrversuch

Reale Fahrversuche ermöglichen die Bestimmung globaler Emissionsfaktoren. Die Probenahme gestaltet sich aufgrund der offenen Bauweise der Bremse, dynamischer Betriebsbedingungen sowie wechselnder chemisch-physikalischer Partikeleigenschaften als Herausforderung. Darüber hinaus liegen kontinuierlich ändernde Verkehrssituationen, der Einfluss des Fahrers oder der Fahrbahnbeschaffenheit vor. Anhand der oben beschriebenen Methodik ist ein Probenahmesystem für Realfahrtanwendung entwickelt worden. Zur Reduktion von Partikelverlusten bzw. Partikelabscheidungen und Einflüssen der Umgebung ist dieses auch als geschlossenes Probenahmesystem konstruiert. Zur Umsetzung der Rotationsbewegung und gleichzeitiger Gewährleistung der Dichtigkeit ist ein Lager integrativer Bestandteil. Zudem sind die aus der Felge sowie den Fahrwerkskomponenten resultierenden Bauraumbedingungen vordefiniert und ermöglichen die Umsetzung eines Systems, was durch kleinste Volumen in Bezug auf die Umhausung sowie den Zu- bzw. Abluftkanal charakterisiert ist. Der konstruktive Aufbau des Probenahmesystems (vgl. Bild 17) sieht eine Rückenplatte, eine vordere Abdeckung (um die Bremsscheibe) und eine Sattelabdeckung vor. An der Rückenplatte angeschlossen ist ein Abluftkanal, welcher sich aus einem flexiblen Teilstück, einem Diffusor und einem geradlinig verlaufenden Kanalstück zusammensetzt. Der Partikelaustritt sowie der adaptierte Kanal sind in Bezug auf Form und Dimensionierung zur Reduktion von Partikelverlusten strömungstechnisch optimiert.



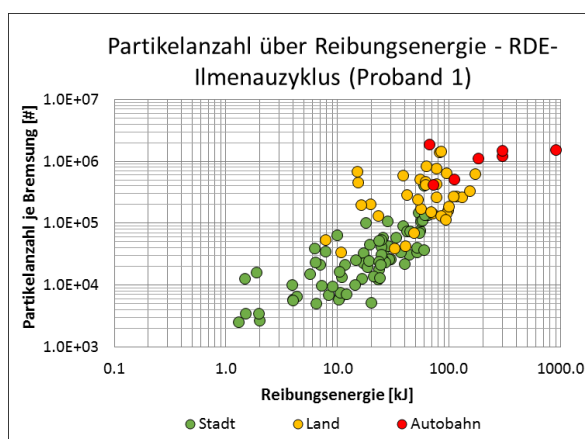
**Bild 17: Konstruktive Gestaltung und Anbau eines Probenahmesystems für den realen Fahrversuch [5]**

Einflüsse auf das Temperaturverhalten des Reibsystems durch die geschlossene Bauweise können unter moderaten Betriebsbedingungen als gering beziffert werden. Durch den konstanten Volumenstrom liegt insbesondere im

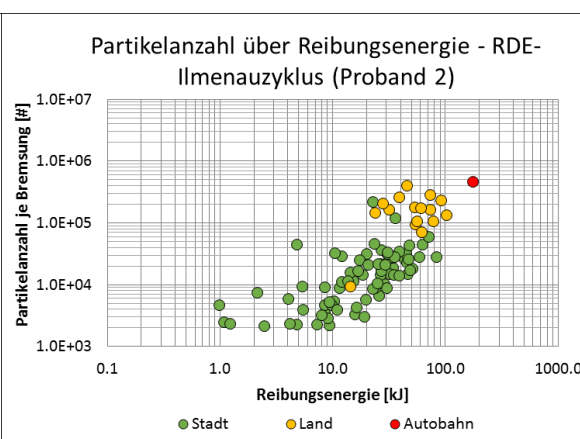


Bereich niedriger Geschwindigkeiten (innerstädtisch) eine bessere Kühlwirkung gegenüber der Bremse ohne Einhausung vor. Im Falle erhöhter Geschwindigkeiten kehrt sich dieser Effekt um, wodurch insbesondere im Falle von Autobahnsektionen eine reduzierte Kühlwirkung vorliegt. Über den gesamten Zyklus ist ein Temperaturunterschied  $< 15\text{ }^{\circ}\text{C}$  nachweisbar.

Nachfolgend wird auf Basis eines gemäß der EU-Verordnung 2016/427 abgeleiteten RDE-Testzyklus die Messfähigkeit des mobilen Probenahmesystems untersucht und erste Erkenntnisse zu den Einflussgrößen während des realen Fahrversuchs abgeschätzt. Die Untersuchung erfolgt für zwei Probanden. Das Versuchsfahrzeug dient ein kommerzieller Mittelklasse-Lieferwagen. Der RDE-konforme Testzyklus basiert auf Stadt, Land und Autobahnsektionen in unmittelbarer Umgebung der Stadt Ilmenau (RDE-Ilmenauzyklus) und besitzt eine Länge von ca. 87,63km. Die zeitliche Vorgabe zur RDE-Konformität:  $(90 < t < 120)$  sowie die prozentualen Anteile jeder Sektion (je  $33,3\% \pm 10\%$ ) sind vom Fahrer einzuhalten. Die Erfassung der Anzahlkonzentration erfolgte mittels eines mobilem Abgasmesssystems PN-PEMS. Dieses Messsystem basiert auf dem Messprinzip eines Kondensationspartikelzählers (CPC), für die gesetzeskonforme Messung verbrennungsmotorischer Abgasemissionen entwickelt. Eine Linearitätsüberprüfung gemäß der oben vorgestellten Methodik verdeutlicht auch zwischen stationären und mobilen CPC eine hohen Grad an Linearität. Die Partikel werden einzeln über einen Größenbereich zwischen  $0,023\text{ }\mu\text{m}$  –  $2,5\text{ }\mu\text{m}$  gezählt. In Bild 18 und 19 ist für jeden Probanden die Partikelanzahl je Bremsung über der Reibenergie gegenübergestellt. Der Vergleich verdeutlicht einen signifikanten Einfluss der Rotationsgeschwindigkeit bzw. Reibungsenergie auf das Emissionsniveau. Demnach sind Bremsungen im innerstädtischen Bereich typischerweise durch niedrigste Partikelanzahlen charakterisiert, wohingegen Autobahnbremsungen Höchstwerte aufweisen. Es ist ableitbar, dass aus einer Verzehnfachung der Reibungsenergie eine um Faktor 20 - 30 erhöhte Partikelanzahl je Bremsung folgt.



**Bild 18: Partikelanzahl über Reibenergie für Proband 1 [5]**



**Bild 19: Partikelanzahl über Reibenergie für Proband 2 [5]**

In Bild 18 und 19 ist erkennbar, dass der überwiegende Anteil der durch eine Vorderradbremse umgesetzten Reibungsenergie zwischen 1 – 200 kJ liegt. Einzelne Bremsungen, insbesondere für Proband 1, liegen oberhalb dieses Bereiches. Interessanterweise ist der innerstädtische Bereich für Proband 1 durch ein deutlich erhöhtes Emissionsniveau charakterisiert, obwohl gemäß der Tabelle 1 eine vergleichbare Reibungsenergie umgesetzt wurde. Als Erklärungsansatz ist eine erhöhte mittlere Initialgeschwindigkeit zu nennen. Proband 2 verzögert überwiegend mittels Motorbremsmoment, wodurch die Aktuierung der Bremse erst bei reduzierten Geschwindigkeiten erfolgt. Letztgenannter Punkt ist auch auf die Verzögerung in den Sektionen Land und Autobahn übertragbar.

**Tabelle 1: Vergleich der Reibungsenergie und des Bremsdruckes [5]**

	Reibungsenergie [kJ]			
	Stadt	Land	Autobahn	$\Sigma$
Proband 1	1.857	2.447	1.943	<b>6.247</b>
Proband 2	1.895	893	180	<b>2.968</b>

Die mittleren Bremsdrücke je Sektion sind von der unterschiedlichen Fahrweise nur geringfügig beeinflusst. Typischerweise nimmt der mittlere Bremsdruck mit Zunahme der Initialgeschwindigkeit ab, was dem Fahrempfinden bzw. der Notwendigkeit von Anpassungsbremsungen (insbesondere Autobahn) zuzuschreiben ist. Wie bereits aus den unterschiedlichen Reibungsenergien ableitbar, weist die Fahrt von Proband 2 eine deutlich

reduzierte Anzahl an Bremsungen in den Sektionen Land und Autobahn auf (Bild 20), was zu signifikanten Unterschieden in der Partikelanzahl je km (Sektion) führt (vgl. Bild 21). Daraus abgeleitet ist die Partikelanzahl je Zyklus-km (bezogen auf den Gesamtzyklus) für Fahrer 2 um Faktor 3,5 reduziert.

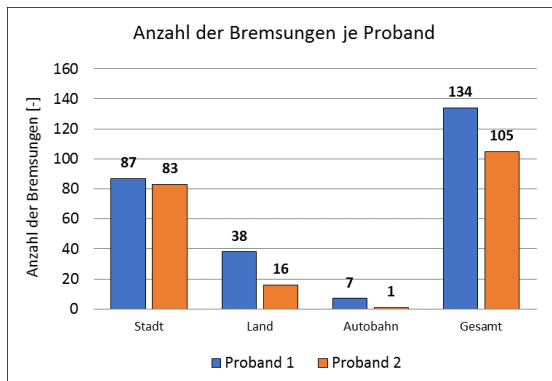


Bild 20: Anzahl der Bremsungen je Proband [5]

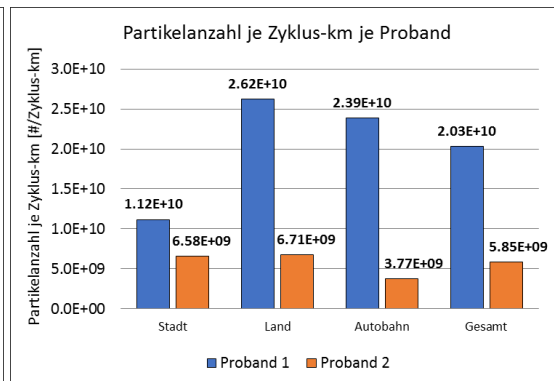


Bild 21: Partikelanzahl je Zyk.-km je Proband [5]

Mithilfe des vorgestellten Probenahmesystems beschränken sich wissenschaftliche Untersuchungen fortan nicht mehr nur auf den Schwungmassen-Bremsenprüfstand (SMP). Durch die Merkmale des Probenahmesystems für Realfahrtanwendung können somit Untersuchungen zum Einfluss des Fahrers, der Verkehrssituation oder der Fahrbahnbeschaffenheit durchgeführt werden. Die Probanden dieser Studie unterscheiden sich in der Fahrweise, wodurch eine signifikante Beeinflussung des Emissionsniveaus der Radbremse folgt. Insbesondere die defensive Fahrweise von Proband 2 sowie die Verwendung des Motorbremsmomentes bewirken diesen Unterschied.

### 3. Primär- und Sekundärmaßnahmen zur Reduktion der Feinstaubemissionen

#### 3.1 Regeneratives Bremssystem

Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsstrang sind in der Lage, die kinetische Energie des Fahrzeuges generatorisch in elektrische Energie umzuwandeln, was eine Reduktion der Bremsenaktuierung in Bezug auf Anzahl, Intensität und Dauer ermöglicht. Je nach Verzögerungswunsch des Fahrers und Charakteristik des Antriebskonzeptes (Mild HEV, PHEV oder BEV) bzw. des regenerativen Bremssystems sind hohe Minderungspotentiale erreichbar. Die Untersuchung basiert auf dem oben vorgestellten JRC-novel cycle. Die umgesetzte Energie je Zyklus entspricht für eine simulierte Vorachsbremse für oben beschriebenes Fahrzeug 3.533 kJ (vgl. Bild 22). Die Einzelverzögerungen und die je Antriebskonzept simulierten Rekuperationsprofile sind in Bild 20 gegenübergestellt.

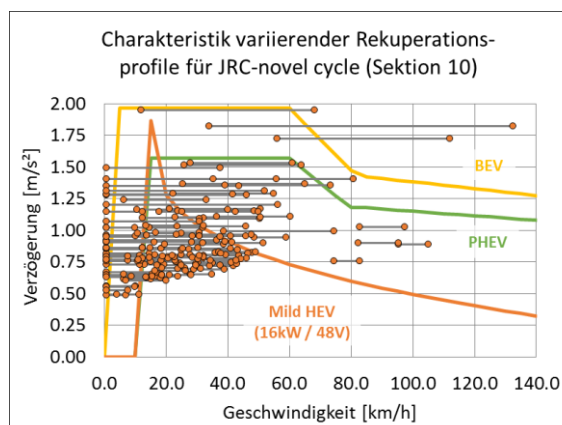


Bild 22: Anzahl der Bremsungen je Proband [4]

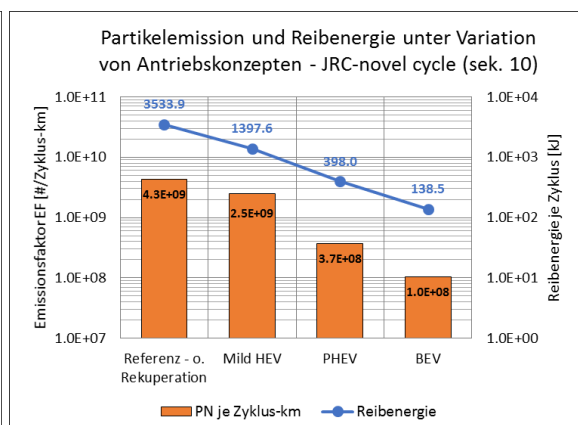


Bild 23: Partikelanzahl je Zyk.-km je Proband [4]

Das Generatormoment steigt bis zu einem spezifischen Maximum. Die maximale Rekuperationsleistung ist je Antriebskonzept und momentaner Geschwindigkeit unterschiedlich und für PHEV und BEV durch einen konstanten Verlauf beschrieben. Dadurch können innerstädtische Verzögerungsprofile abgedeckt werden. Die

maximale Verzögerungsübernahme liegt im Falle des BEV bei 1,96m/s<sup>2</sup>, PHEV bei 1,57m/s<sup>2</sup> und Mild HEV bei 1,28 m/s<sup>2</sup>.

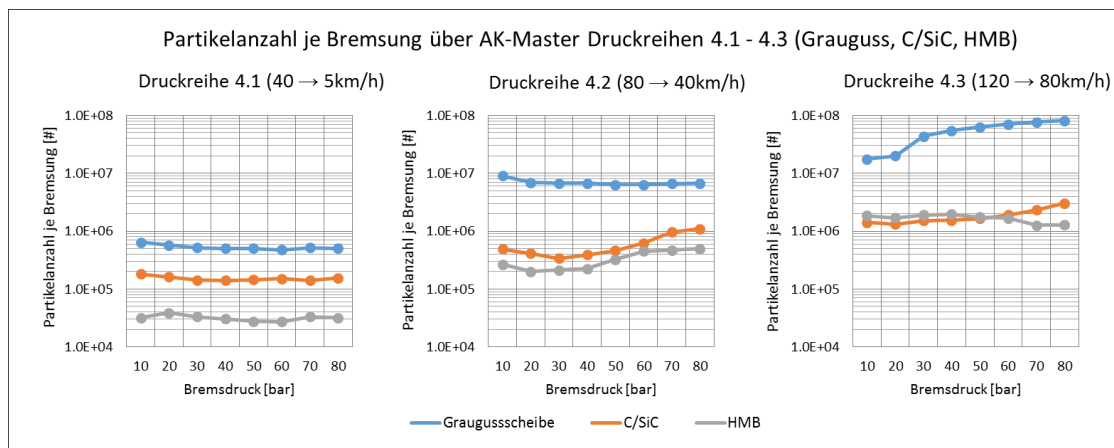
Die Partikelzählung erfolgt mittels stationärem Kondensationspartikelzähler (CPC). Im Falle des JRC-novel cycle liegt unter Simulation eines Mild HEV ein Abfall auf 39 % der Bremsleistung sowie auf 57% des Emissionsfaktors vor (vgl. Bild 23). Unter Zunahme des durch das regenerative Bremssystem umgesetzten Verzögerungsmomentes, im Falle eines PHEV oder BEV, sinken die Reibenergie je Zyklus und der Emissionsfaktor deutlich. Minderungspotentiale von bis zu 97 % (BEV) können erreicht werden.

Zusammenfassend ermöglichen regenerative Bremssysteme eine Reduktion der Anzahl an Bremsapplikationen, einen reduzierten mittleren Bremsdruck und eine reduzierte mittlere Reibzonentemperatur. Dadurch wird ein wesentlicher Beitrag zur Reduktion partikelförmiger Bremsenemissionen geleistet. Aus diesem Vorteil folgend, steigt jedoch der Einfluss der Korrosion bzw. eine Beeinflussung der Bremsperformance (insbesondere für Graugusssscheiben). Abhilfe bieten alternative Scheibenkonzepte, welche nachfolgend genauer betrachtet werden.

### 3.2 Minderungspotentiale alternativer Bremsscheibenkonzepte

Derzeit werden Bremsscheiben vorwiegend aus preiswertem perlitischem Grauguss (GG15 ... GG25) hergestellt. Wie bereits oben beschrieben, ist insbesondere die mangelnde Korrosionsbeständigkeit als Negativpunkt zu deklarieren. Gegenüber alternativen Scheibenkonzepten, wie hartmetallbeschichtete Scheiben (HMB) oder kohlenstofffaserverstärkten Siliciumcarbid-Bremsscheiben (C/SiC), weisen diese auch eine verminderte Verschleißfestigkeit auf. Das Reibverhalten bleibt je nach Belagzusammensetzung erhalten.

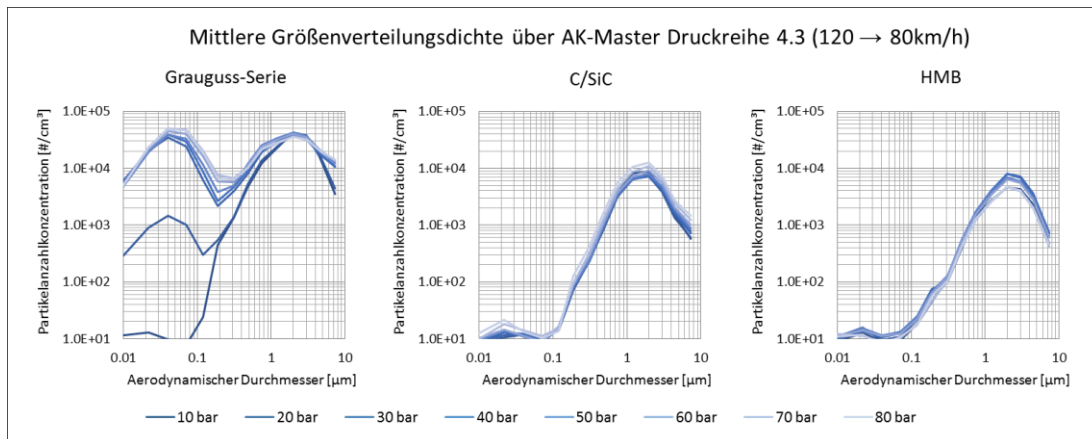
Im Rahmen dieser Studie werden die zwei beschriebenen Scheibenkonzepte gegenüber einer konventionellen Graugusssscheibe mit kupferhaltigem ECE-Belag verglichen. Die Scheibenkonzepte werden jeweils mit einem darauf abgestimmten und bereits in Serie befindlichen Belag getestet. Die Untersuchung basiert auf den AK-Master Druckreihen, Sektionen 4.1 (40 → 5 km/h), 4.2 (80 → 40 km/h) und 4.3 (120 → 80 km/h). Dadurch kann das Minderungspotential über Geschwindigkeitsbereiche untersucht werden, welche äquivalent zu Stadt, Land und Autobahn sind. Die in Bild 24 gegenübergestellten Partikelanzahlen je Einzelbremsung über die untersuchten Geschwindigkeitsbereiche und Bremsdruckprofile, verdeutlicht für jedes Scheibenkonzept ein charakteristisches Profil. Beträgt das Minderungspotential der C/SiC im Falle des niedrigsten Geschwindigkeitsbereiches (Druckreihe 4.1) ca. 70 – 75 %, erreicht es für Druckreihe 4.3 bereits ca. 95%. Gleiches gilt für die hartmetallbeschichtete Scheibe, wohingegen im Falle des niedrigsten Geschwindigkeitsbereiches deutlich höhere Minderungspotentiale gegenüber der konventionellen Graugusssscheibe zu erzielen sind.



**Bild 24: Partikelanzahl je Bremsung/Scheibenkonzept über AK-Master Druckreihen 4.1 – 4.3**

Das Emissionsniveau ist im niedrigen Geschwindigkeitsbereich je Scheibenkonzept nur geringfügig durch den Bremsdruck beeinflusst. Aus der Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit und des Bremsdruckes resultiert insbesondere für die Graugusssscheibe ein signifikanter Anstieg (von 20 auf 30 bar) der emittierten Partikelanzahl. Dieser Effekt ist durch die Änderung der chemisch-physikalischen Eigenschaften zu erklären und durch eine bimodale Partikelverteilung gekennzeichnet (vgl. Bild 25).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass alternative Scheibenkonzepte in Bezug auf den partikelförmigen Verschleiß deutliche Vorteile gegenüber konventionellen Graugusssscheiben bieten. Diese steigen mit Zunahme der Beanspruchung. Darüber hinaus bieten alternative Scheibenkonzepte eine deutlich verbesserte Korrosionsbeständigkeit. Nachteilig wirkt sich der Preis aus, welcher insbesondere in den Volumensegmenten eine große Hürde darstellt.



**Bild 25: Größenverteilungsdichte je Bremsung/Scheibenkonzept über AK-Master Druckreihe 4.3**

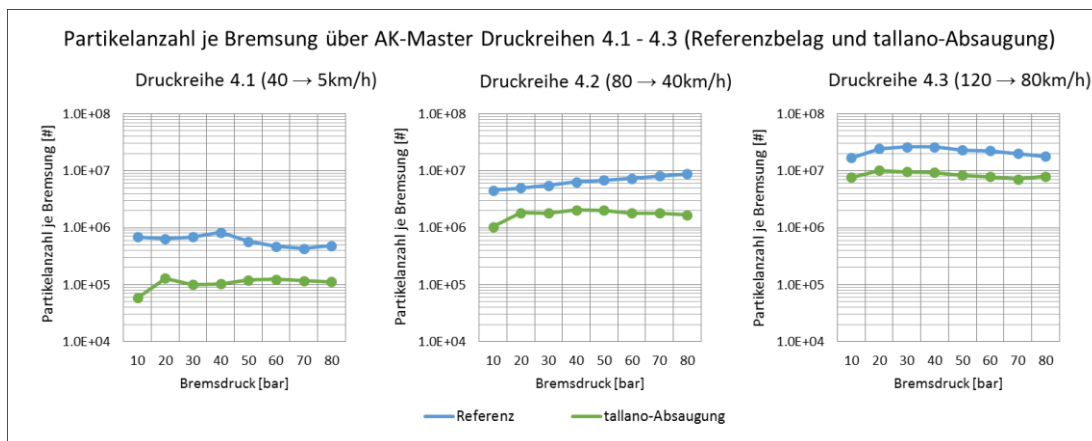
### 3.3 Minderungspotentiale durch Sekundärmaßnahmen

Mit Bremsstaubfiltern, entwickelt durch Fa. Mann+Hummel (vgl. Bild 26) und Bremsstaubsaugern, entwickelt durch Fa. tallano technologie (Bild 27), stehen unterschiedliche Konzepte zur Aufnahme des emittierten Bremsstaub bereit bzw. befinden sich in der Entwicklung und bieten Potentiale zur Reduktion des von einem Fahrzeug emittierten Bremsstaubes. Dabei wird der Bremsstaub einerseits durch einen am Sattelauslass adaptierten Filter aufgenommen bzw. durch einen im Belag integrierten Slot abgesaugt und in einem Filter abgeschieden.



**Bild 26: Bremsstaubfilter Fa. Mann+Hummel [3]    Bild 27: Bremsstaubsauger Fa. tallano tech. [2]**

Am Beispiel einer konventionellen Grauguss-Scheibe mit kupferhaltigem ECE-Belag wird das Minderungspotential des von tallano technologie entwickelten Bremsstaubsaugers untersucht. Aufbauend auf den Untersuchungen zum Potential alternativer Scheibenkonzepte, dienen die AK-Master Druckreihen zur Bestimmung der Minderungspotentiale.



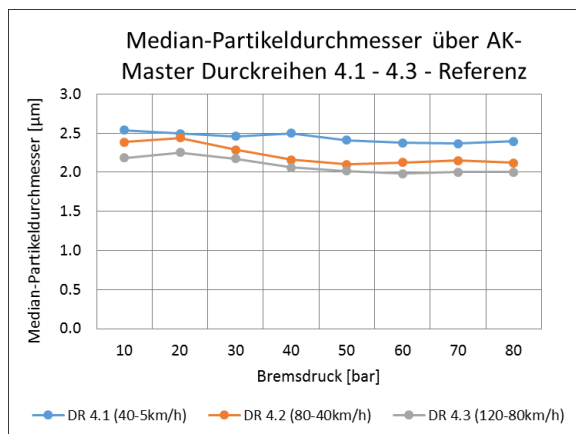
**Bild 28: Partikelanzahl je Bremsung über AK-Master Druckreihen 4.1 – 4.3 – Absaugung [2]**



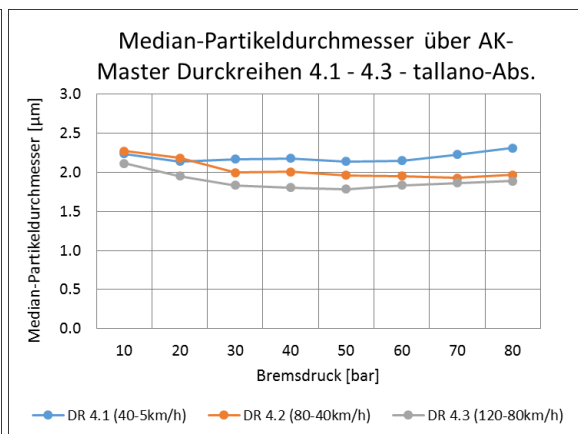
Aus den in Bild 28 gegenübergestellten Partikelanzahlen je Einzelbremsung über die untersuchten Geschwindigkeitsbereiche und Bremsdruckprofile geht hervor, dass mit dem Bremsstaubsauger ein deutliches Minderungspotential erreicht werden kann. Dieses ist insbesondere für niedrige Geschwindigkeitsbereiche hoch (bis zu 90 %) und nimmt mit Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit bzw. mit der Reduktion des Partikeldurchmessers ab (ca. 55 %). Die Absaugwirkung ist demnach von dem Partikeldurchmesser abhängig und sinkt, desto niedriger dieser ist.

Eine Untersuchung größenspezifischer Abhängigkeiten erfolgt mittels des bereits beschriebenen elektrischen Niederdruck-Kaskadenimpaktors (ELPI+). Aus den erfassten Daten wird der Median-Partikeldurchmesser berechnet, welches als charakteristische Größe zur Bewertung der Partikelgrößenverteilung herangezogen werden kann.

Die in Bild 29 und 30 gegenübergestellten Kurven verdeutlichen, dass durch die Absaugvorrichtung eine Reduktion des Partikeldurchmessers folgt, was die oben getroffene Aussage bestätigt. Der Median-Partikeldurchmesser beträgt im Falle der Referenz und Druckreihe 4.1 zwischen 2,4 – 2,55 µm und fällt in Abhängigkeit von der Rotationsgeschwindigkeit und dem Bremsdruck. Für eine aktivierte Absaugung liegt der Median-Partikeldurchmesser zwischen 0,1 – 0,45 unterhalb der Referenz [2].



**Bild 29: Median-Partikeldurchmesser - Referenz**



**Bild 30: Median-Part.-durchmesser – Absaugung**

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass mit der vorgestellten Absaugvorrichtung Bremsstaub-Minderungspotentiale von bis zu 90 % (bezogen auf die Partikelanzahl) erreicht werden können. Das Minderungspotential wird jedoch von den Eigenschaften der emittierten Partikel (insbesondere dem Partikeldurchmesser) und damit auch vom Fahrkollektiv beeinflusst. Folgt aus den Einfluss der Belagzusammensetzung, des Scheibenkonzeptes oder des Beanspruchungskollektivs (Rotationsgeschwindigkeit, bremsdruck oder Temperatur) ein reduzierter Partikeldurchmesser, so besitzt die vorgestellte Absaugvorrichtung eine deutlich reduzierte Effizienz. Neben den Vorteilen der Emissionsminderung ist der Nachteil der benötigten Energie zum Betrieb der Absaugvorrichtung zu nennen.

## Danksagung

An dieser Stelle bedanken wir uns recht herzlich bei Hr. Dr. Sebastian Gramstat (Audi AG) für die Bereitstellung eines Versuchsfahrzeuges für die Durchführung der Messungen im realen Fahrversuch. Darüber hinaus bedanken wir uns bei Hr. Alexander Trommer (AIP GmbH & Co. KG) für die Bereitstellung eines mobile Abgasmesssystems (PN-PEMS), auf Basis eines Kondensationspartikelzählers (CPC).

## Literaturverzeichnis

- [1] Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Feinstaub (PM10)-Emissionen des Straßenverkehrs seit 1995 in Baden-Württemberg. (URL: <https://www.statistik-bw.de/Umwelt/Luft/11a07aub.jsp>.)
- [2] Hascoet, M., et.al.: At Source Brake Dust Collection System, chassis.tech plus 2019, München, Deutschland
- [3] Bock, L., et.al.: The brake dust particle filter for fine dust reduction, Eurobrake 2019, Dresden, Deutschland

- [4] Hesse, D.: Beitrag zur experimentellen und analytischen Beschreibung partikelförmiger Bremsenemissionen, Dissertation, Technische Universität Ilmenau (unveröffentlicht)
- [5] Augsburg, K., Hesse, D.; Real driving emissions measurement of brake dust particles, EuroBrake 2019, Dresden
- [6] Moisio, M. et.al.: Preliminary Results for Brake Wear Particle Emission PN and PM Concentration and Size Distribution Measurements, 50th PMP meeting 2019, Brüssel, Belgien